COMENTARIO

Caudal ecológico: definiciones, metodologías y adaptación a la región andina

Aguilera, Gastón[1]; Marc Pouilly[2]

[1] Fundación Miguel Lillo-CONICET, Tucumán, Argentina, aguileragaston@gmail.com

[2] Institut de Recherche pour le Développement (IRD) - UMR BOREA, Museum National d'Histoire Naturelle, Paris, Francia, marc.pouilly@ird.fr

➤ **Resumen** — Una forma de satisfacer la creciente demanda de agua necesaria para la producción eléctrica y el abastecimiento doméstico, industrial y riego producida por el aumento poblacional mundial, es la creación de represas. Estas, sin embargo, pueden generar modificaciones de los hábitats físicos y químicos, que producen cambios en las comunidades biológicas existentes y en el funcionamiento ecológico de los ríos, llevando incluso a la desaparición de especies sensibles y de beneficios para las poblaciones humanas. El concepto de caudales ecológicos surge entonces como una necesidad para restaurar y conservar la integridad ecológica de los ríos. En este trabajo, se revisan las principales definiciones y alcances del concepto y se presentan también las líneas de evaluación de caudales ambientales/ecológicos. Luego de un análisis de la situación sudamericana, se hace una sugerencia de adaptación a la región andina de uno de los métodos más importantes de evaluación de caudales ecológicos.

Palabras Clave: caudales ecológicos, gestión del agua, Sudamérica

➤ **Abstract** — "Environmental flow: definitions, methods and adaptation to the Andean region". A response to the increasing demand for water for the production of electricity and for domestic, industrial and irrigation uses, due to global population growth, is the creation of dams. These, however, can generate modifications in the physical and chemical habitats, producing changes in the existing biological communities and in the ecological function of rivers, possibly including the disappearance of sensitive species and benefits to human populations. The concept of environmental flow emerges as a need to restore and conserve the ecological integrity of rivers. In this paper, we review the main definitions and scope of the concept, and we also present the methods of environmental flow assessment. After an analysis of the South American situation, we make a suggestion of adaptation to the Andean region for one of the most important environmental flow assessment method.

Key words: environmental flows; water management; South America.

INTRODUCCIÓN

La gestión del agua es uno de los retos más importantes de este nuevo siglo. Debido a los escenarios de cambios climáticos, muchos gobiernos anticipan la futura disminución del recurso agua. En los países de la región andina, este escenario se confronta, además, a un incremento de la demanda en agua debido a las crecientes necesidades energéticas y productivas de los países. Por ejemplo, en Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú, las principales actividades económicas presentaron un crecimiento en los últimos 10 años, las cuales estuvieron acompañadas por un mayor consumo de energía eléctrica (Compendio de Series Estadísticas de la Comunidad Andina, 2011). Una de las soluciones implica la regulación del recurso agua mediante la construcción de represas que, además de permitir un control sobre el uso temporal del volumen de agua, limitan los efectos negativos de los eventos hidrológicos extremos (sequía e inundación) y permiten la producción de energía percibida como renovable y «limpia». Así, en las regiones tropicales, cientos de represas fueron construidas en los últimos años para suplir en particular las demandas de energía eléctrica (Anderson *et al.*, 2006), y en la parte andina de la cuenca amazónica están proyectadas más de 150 represas con capacidad de produc-

Recibido: 29/11/11 – Aceptado: 03/08/12

ción de energía eléctrica mayor a 2MW (megawatts), durante los próximos 20 años (Finer y Jenkins, 2012). Pero más allá de su relevancia económica y productiva, las represas pueden generar impactos socio-ambientales y ecológicos importantes. Así, la Comisión Mundial de las Represas (World Commission on Dams, en inglés) concluyó que el rol de las represas para el desarrollo humano es importante pero, en muchos casos, han generado un costo «inaceptable y a menudo innecesario en especial en términos sociales y ambientales» (WDC/CMR, 2000).

Esta conclusión implica reflexiones tanto sobre la importancia de la evaluación de los impactos de estas obras como así también de todas las actividades que generan cambios físicos o hidrológicos en los sistemas acuáticos como sobre el desarrollo de herramientas adaptadas a mejorar la gestión de su funcionamiento y la selección de los sitios para su implementación.

El funcionamiento ecológico de un río está fuertemente vinculado a su hidrología, por lo que una alteración en cualquiera de los cinco principales componentes del régimen de caudales (duración, frecuencia, magnitud, predictibilidad y periodicidad) puede, directa o indirectamente, afectar la integridad ecológica del río (Poff *et al.*, 1997, Fig. 1). Las consecuencias ambientales de las represas se producen primeramente a través de efectos físicos directos debido al control del flujo de agua, produciendo efectos negativos tanto aguas arriba como aguas debajo de la represa. Estos efectos responden, aguas arriba de las represas, a la transformación de los ambientes loticos en ambientes lénticos o semi-lénticos, y a la posterior estratificación térmica y química de la columna de agua una vez llena la represa, junto con la descomposición de la materia orgánica que quedó sumergida durante el llenado. Estos factores pueden producir un deterioro de la calidad de agua en los embalses por acidificación, disminución del oxígeno disuelto, *stress* térmico, retención de sedimentos y nutrientes en la represa (Agostinho *et al.*, 2008). Aguas debajo de las represas, los efectos negativos son causados por el cambio del ciclo hidrológico (estacionalidad e intensidad de las sequías e inundaciones) que genera un deterioro de la calidad física y química de los hábitats por la intensificación de los procesos erosivos (por retención de sedimentos en el embalse), modificación de la morfología (desconexión de las llanuras de inundación, pérdida de diversidad de hábitat) y un decrecimiento de la productividad por la disminución de los nutrientes atrapados en el embalse.

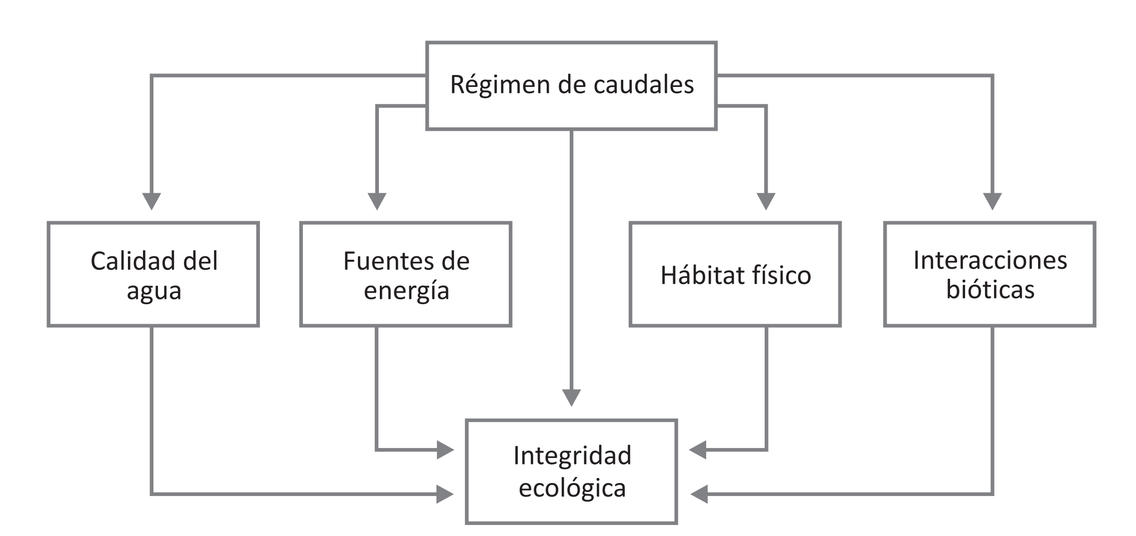


Figura 1. Diagrama de importancia del régimen de caudales para mantener la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos de agua dulce. Adaptado de Poff *et al.* (1997).

Estos cambios físicos directos pueden tener un impacto sobre la biota, cambiando su composición y diversidad: Murchie *et al.* (2008) recopilaron los trabajos publicados entre 1970 al 2006 relacionados a los efectos de la regulación de un río sobre los peces y su hábitat, y citaron, entre estos, la disminución en abundancia y diversidad, los desplazamientos de especies sensibles y dominancia de especies tolerantes a las regulaciones en caudal, y alteraciones en los patrones de migración. Los efectos de la regulación de los ríos por represas también afectan la distribución y abundancia de los macroinvertebrados bentónicos (Anderson *et al.*, 2011), los cuales son componentes claves de los ecosistemas acuáticos, encargados del procesamiento de la materia orgánica e interviniendo en los procesos de autodepuración de los ríos. Entre los efectos indirectos se pueden mencionar: la acumulación y transformación de contaminantes, la producción de gas de efecto invernadero y la disponibilidad de hábitats favorables para los vectores de enfermedades en las nuevas áreas inundadas por el embalse.

Distintas medidas de mitigación que consideran la importancia de la hidrología en el control del funcionamiento ecológico de los ríos y los efectos de las represas en los ecosistemas acuáticos son tomadas para conservar o recuperar la biodiversidad y los servicios ecológicos de los ríos. Entre las medidas de mitigación más comunes se encuentran: la provisión de pasajes para peces, la realización de acciones para mantener o recuperar una adecuada calidad de agua tanto dentro del embalse como en la descargada en los canales de salida de la represa, y la aplicación de un régimen de caudales ecológicos (EMTS, 2010). Entre éstas, los caudales ecológicos se presentan actualmente como una de las medidas de mitigación que puede ser aplicada en ríos donde existen distintos tipos de usos del recurso que compiten entre sí. Resulta importante comprender sus alcances y limitaciones a la hora de implementar un régimen de caudales de este tipo para garantizar los beneficios socio-económicos-ecosistémicos entre las distintas partes involucradas. Por estos motivos en la primera parte de este ensayo presentamos de forma global las definiciones actuales de los caudales ecológicos y ambientales y una breve descripción de los principales tipos de metodologías utilizadas.

En la segunda parte de este trabajo presentamos un resumen de la situación del uso actual de los ríos en la región andina y de las proyecciones a futuro, para establecer un punto de partida para futuras implementaciones de estudios de caudales ecológicos en la región andina, y presentamos, finalmente, las grandes líneas para la adaptación de una de estas metodologías (PHABSIM, por simulación del hábitat físico) a la región andina.

CAUDAL AMBIENTAL Y ECOLÓGICO. DEFINICIONES Y CONCEPTOS

El concepto de caudal ambiental se encuentra ampliamente tratado en la literatura científica (*e.g.*, Dyson *et al.*, 2003). La profusión de definiciones, desde la más sencilla hasta la más compleja y técnica, tienen en común que todas se refieren a la idea del volumen y calidad de agua que se debe mantener en un río para conservar su funcionamiento ecológico y asegurar el ciclo de vida de los organismos que lo habitan.

Recientemente el concepto fue incluido en las normas legislativas de muchos países pero en general el término es definido de manera muy general y su nivel de precisión no permite una aplicación concreta directa. Por ejemplo, entre los países sudamericanos, Ecuador incluye el concepto en el Artículo 318 de su Constitución Nacional del 2008, donde se menciona que «*el Estado se hace responsable directo de la planificación y gestión de los recursos hídricos*», garantizando entre otros, el caudal ecológico, y prosigue en su Artículo 411 indicando que «*el Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico*», regulando toda actividad que pueda afectar al recurso agua, incluyendo sus ecosistemas. Perú incluye este concepto en el Artículo 53 de la Ley

Nº 29338 de Recursos Hídricos del 2009, el cual condiciona el otorgamiento de una licencia de uso de agua al hecho que «*la fuente de agua a la que se contrae la solicitud tenga un volumen de agua disponible que asegure los caudales ecológicos, los niveles mínimos de reservas o seguridad de almacenamiento y las condiciones de navegabilidad, cuando corresponda y según el régimen hidrológico*». Por último, en Chile, la Ley 20417 del 2010 indica que «*se determinarán los criterios en virtud de los cuales se establecerá el caudal ecológico mínimo*». En Argentina, no existen referencias a nivel nacional sobre el concepto de caudales ecológicos, aunque algunas provincias incorporan el término. Por ejemplo, la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable de la provincia de Salta, en su tratado para el «Desarrollo integrado y sustentable de la cuenca del Río Bermejo: uno de los mega proyectos del país», menciona la creación, en 1982, de la COREBE (Comisión Regional del Río Bermejo), según ley provincial N° 22697, y define el caudal ecológico para las Juntas de San Antonio (confluencia de los ríos Bermejo y Tarija) de 12 m^3/seg. En Jujuy, en el año 1998, se sanciona la Ley provincial N° 5063 «Ley General de Medio Ambiente», en cuyo artículo 88, Inciso «I» se dictamina que: «*Para la prevención y control de la contaminación del agua corresponde al Poder Ejecutivo Provincial, fijar los caudales mínimos ecológicos que deberán conservarse en cada curso de agua natural*».

Históricamente dos términos fueron principalmente utilizados: el caudal mínimo (minimum flow) y el caudal interno necesario (traducción literal del inglés «instream flow requirements»). Sin embargo, están poco vinculados con la idea de dinámica y funcionamiento ecológico, y actualmente son menos usados, reemplazándose por los términos de caudal ambiental (environmental flow) y caudal ecológico, muchas veces usados como sinónimos aunque pueden reflejar una visión complementaria. El caudal ecológico se define como la cantidad y calidad de agua necesaria para mantener o restaurar la biodiversidad y un funcionamiento casi óptimo del ecosistema acuático. Para esto, se supone que el nivel de conservación o restauración puede ser alcanzado con un caudal menor que el caudal natural, asumiendo que la extracción de la parte del caudal que diferencia el caudal natural del caudal ecológico no tendrá consecuencias notables sobre el sistema. Este caudal ecológico debe ser considerado como una parte del caudal ambiental, el cual incluye todos los usos a realizarse en el río ya sean de servicios básicos, industriales, agrícolas, energéticos, turísticos, ecológicos, cultural, etc. Este último concepto aparece como un compromiso de derechos de uso del recurso agua que implica una negociación entre los actores, siendo el funcionamiento ecológico y el ciclo de vida de los organismos que lo colonizan, vistos como usuarios. En algunos países el marco legal reconoce una jerarquía entre los distintos usos, donde los servicios básicos y el funcionamiento ecológico están privilegiados en relación a los otros usos económicos como por ejemplo en el Artículo 411 de la Constitución de Ecuador del 2008, donde «*La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua*». Sin embargo, más allá de esa jerarquía, el compromiso de negociación se basa sobre un objetivo social: la función del río en la población, región o el país. Antes de los pasos técnicos que presentaremos más adelante, el proceso de reflexión acerca de este objetivo y su definición es, sin duda, el paso más crítico de la estimación del caudal ambiental. Existe una oposición entre los grupos de usuarios según sus actividades (Fig. 2). Un primer grupo (turismo y recreación, áreas protegidas, cultura, usos de recursos biológicos) buscará acercar el concepto de caudal ambiental al del caudal ecológico, porque sus intereses están relacionados a conservar o restaurar el funcionamiento ecológico y los servicios ambientales que provén los sistemas naturales (calidad de agua, amortiguación de las inundaciones y sequias, biodiversidad, protección de las especies nativas, producción de recursos naturales, circulación de elementos químicos naturales y de

los sedimentos, estética, etc.); mientras que un segundo grupo (riego, agricultura, industria, energía), generalmente más potente económicamente y en la toma de decisiones, buscará alejar el caudal ambiental del caudal ecológico llevándolo hacia un caudal mínimo, porque su interés está relacionado a la extracción del recurso agua, la modificación del ciclo hidrológico y de los hábitats, sin que la calidad física y química del agua sean de mayor preocupación. Los servicios básicos se encuentran entre estos dos grupos, teniendo una actividad extractiva o uso consuntivo, pero con una fuerte preocupación sobre la calidad química del agua.

Por concepto, el caudal ambiental busca contestar a la pregunta, ¿en qué medida podemos modificar (reducir) el caudal de un río de su estado natural sin alterar de forma perjudicial su funcionamiento e integridad ecológica? En ríos regulados, el concepto se aplica para restaurar un «buen estado ecológico» y los servicios ambientales relacionados. Los métodos desarrollados para calificar el buen estado y la integridad ecológica se basan en distintos tipos de criterios, indicadores indirectos cualitativos o cuantitativos del funcionamiento del río, por los cuales es posible estimar las variaciones de estado o valor por un rango de caudal y en algunos casos por diferentes periodos hidrológicos del río. Estos criterios, en general, están basados en objetivos específicos relacionados a la futura condición deseada del ecosistema, como por ejemplo el mantenimiento o mejoramiento de los ecosistemas acuáticos, incluyendo la biota acuática y de ribera, la maximización de la producción comercial de peces, la conservación de especies en peligro, o la protección de valores culturales, recreacionales o científicos (Tharme, 2003).

Tanto los objetivos buscados como la metodología usada en cada país o región para realizar un estudio sobre la evaluación de los caudales ecológicos dependen de la disponibilidad de tiempos y recursos para

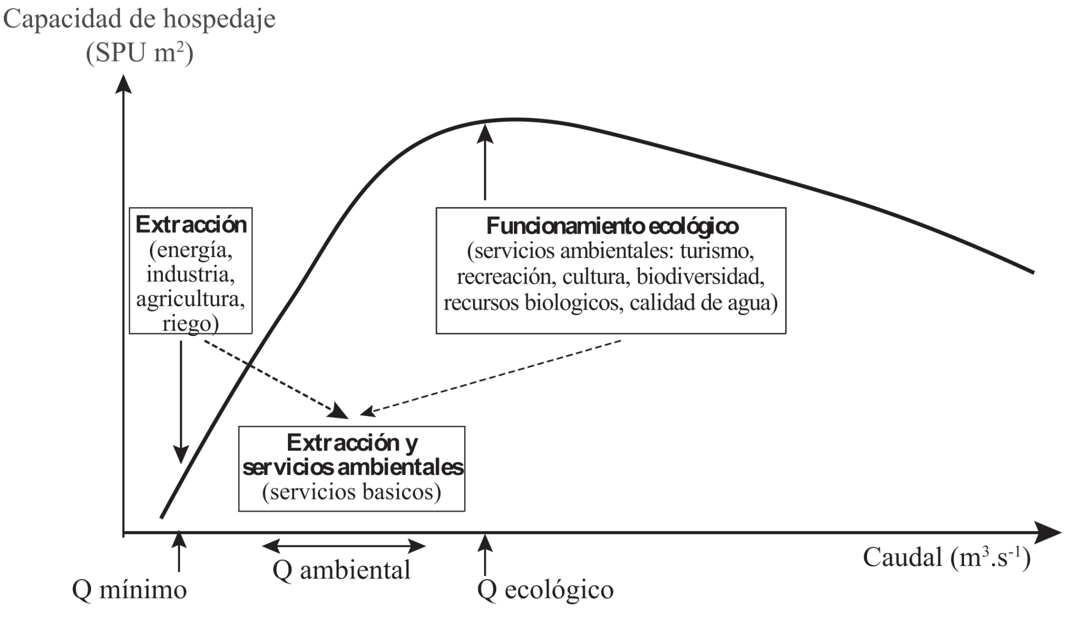


Figura 2. Curva teórica de evolución de la capacidad de hospedaje de una especie de peces (o Superficie Potencialmente Utilizable como evaluada en el método PHABSIM), indicadora del funcionamiento ecológico del río. Los caudales mínimo, ambiental y ecológico están ilustrados en relación a los usos que favorecen. Esos caudales deben variar en función al ciclo hidrológico y a los ciclos biológicos de los organismos indicadores (por ejemplo, para los peces: reproducción, crecimiento de alevines, estiaje para los adultos).

realizar el estudio, lo cual dio origen a una gran variedad de métodos de evaluación.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

Tharme (2003) reportó la existencia de más de 200 métodos de evaluación de los caudales ambientales o ecológicos usados en 44 países del mundo. Esa abundancia de métodos corresponde, en su gran mayoría, a la adaptación de algunas metodologías principales, las cuales pueden ser clasificadas en cuatro grupos que se diferencian principalmente según dos tipos de criterios:

– la integración de parámetros físicos (hidrológicos o hidráulicos) o físicos y biológicos;

– su capacidad a generar escenarios de evolución temporal de la calidad ecológica por modelación o mediante el peritaje de expertos.

Los métodos basados solo en parámetros físicos (ejemplos 1, 2) son cada vez menos usados, mientras que las últimas tendencias muestran que la evaluación de caudal ambiental se realiza en forma complementaria entre métodos de modelación con enfoque más restringido, como es el caso de los métodos de simulación del hábitat potencialmente favorable a los organismos indicadores (ejemplo 3) y métodos holísticos en base a peritaje (ejemplo 4).

1) EJEMPLO DE MÉTODOS HIDROLÓGICOS

El método de Montana o Tennant (1976) surgió a partir de un estudio regional de observación de la fauna íctica y de parámetros físicos que representan el hábitat de los peces. Tennant (1976) realizó observaciones en 58 secciones transversales repartidas en once ríos de los estados de Montana, Nebraska y Wyoming (EE.UU.). Los parámetros considerados fueron: el ancho, la profundidad, el sustrato, la temperatura, los lechos secundarios, las islas, la cobertura vegetal, los invertebrados, las migraciones, la pesca, la navegación y la estética del paisaje. A partir de estos datos el autor estableció una relación cualitativa entre la calidad del hábitat y el porcentaje del caudal anual natural. Esta clasificación permite determinar, en primera aproximación, el caudal ambiental a conservar en un río del área de estudio en relación al objetivo de conservación que se plantea. Sin embargo no permite analizar las particularidades de cada río y las clases de objetivos son subjetivas y no permiten modularse en relación al ciclo hidrológico y a las diferentes etapas funcionales del río.

2)EJEMPLO DE MÉTODOS HIDRÁULICOS

El método del perímetro mojado («wetted perimeter», Collings, 1972, Fig. 3) se refiere a una relación teórica entre la superficie

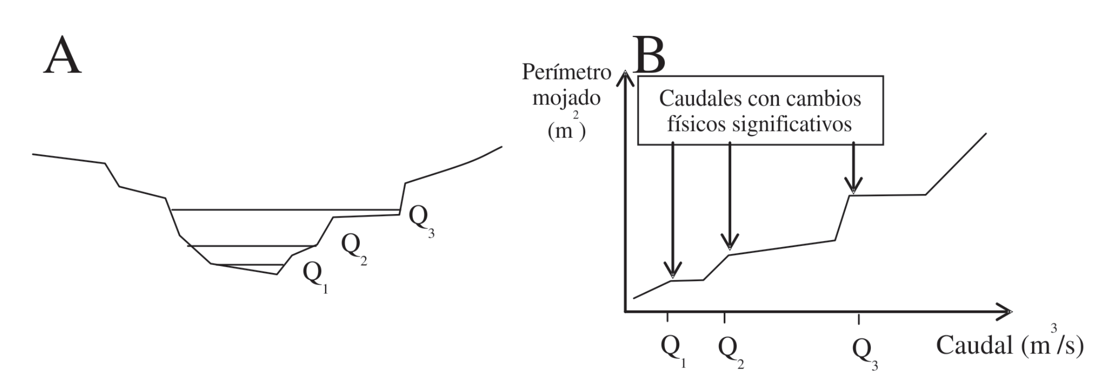


Figura 3. A- Sección transversal de un río y B- relación entre el caudal y el perímetro mojado en este río. Los caudales en los cuales se produce un cambio físico significativo en relación a la morfología del lecho son remarcados (Q_1, Q_2 y Q_3).

inundada y la cantidad y diversidad de los hábitats para los peces y la biota en general. Los puntos de inflexión en la relación entre el perímetro mojado y el caudal sirven para calificar los caudales que presentan una relación elevada entre superficie inundada y caudal. Este método no toma en cuenta la calidad del hábitat ni las preferencias de hábitat de los peces y no permite una evaluación cuantitativa para una especie indicadora.

3) Ejemplo de métodos de modelización del hábitat

Los métodos de modelización del hábitat y en particular el método PHABSIM (Physical Habitat Simulation) son uno de los modelos de definición de caudal ecológico más eficientes y más utilizados en la actualidad (Tharme, 2003). El método PHABSIM (Bovee, 1982) corresponde a una herramienta de previsión que acopla modelos biológicos e hidráulicos para evaluar los cambios en la capacidad de hospedaje del río para una especie sobre un rango de caudal (Fig. 4). Los modelos biológicos corresponden a curvas de preferencia de hábitat de la especie (generalmente peces y a veces macroinvertebrados acuáticos) para los principales factores hidráulicos que controlan su presencia (profundidad de agua, velocidad de corriente y sustrato). Los modelos hidráulicos generan una estimación del valor de estos factores del hábitat físico sobre un tramo del río y por un rango de caudal. El acople evalúa la superficie potencialmente útil (favorable) o SPU, relacionando las estimaciones de condiciones físicas del hábitat y el valor de esas condiciones para la especie. El análisis de los resultados interpreta los caudales con una mayor SPU como caudales ecológicos. Un análisis de series temporales de las condiciones del hábitat permite adecuar un caudal favorable para cada temporada del ciclo hi-

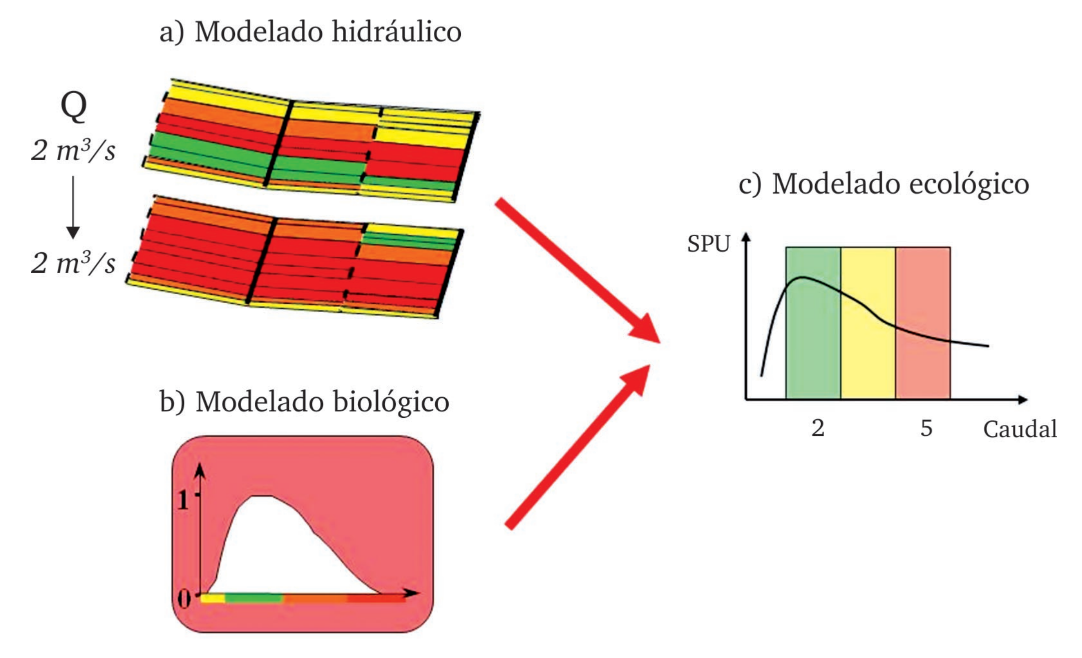


Figura 4. Esquema del acople entre los modelos hidráulicos y biológicos según PHABSIM. a) modelización hidráulica de un tramo de río. Para cada caudal el modelo estima en cada celda (rectángulos) el valor de los parámetros de velocidad, profundidad y sustrato; b) Modelo biológico. La curva indica las preferencias (entre 0 y 1) de la especie para cada valor de velocidad, profundidad y sustrato; c) Evolución de la Superficie Potencialmente Utilizable (SPU) par la especie en un rango de valor de caudal modelado.

drológico natural, lo que puede permitir la consideración de las diferentes fases de los ciclos biológicos de la especie indicadora, como la migración, reproducción, condiciones críticas de estiaje, etc.

Estos métodos suponen la selección de especies indicadoras o representativas, que reflejan el funcionamiento ecológico global del río y que deben ser elegidas en relación a los objetivos de cada estudio. En ríos de baja diversidad, el objetivo de optimizar el caudal que favorece la especie (nativa) dominante es pertinente. En ríos con alta diversidad, la elección de la especie resulta más compleja y se pueden considerar distintos enfoques, como por ejemplo optimizar el hábitat de las especies que presenten importancia local, cultural o comercial o de especies «paraguas» (que representan funcionalmente las demás especies), establecer gremios de especies que representan las diferentes estrategias de uso del hábitat, o buscar un caudal que favorezca una comunidad de peces cuya composición se asemeja a una comunidad de referencia natural regional (actual o histórica).

4) Ejemplo de métodos holísticos

La Metodología de Bloques de Construcción (Building Block Methodology, BBM; King y Louw, 1998; King *et al.*, 2000, 2008) utiliza el hidrograma natural del río para establecer las necesidades de caudal en cantidad y cambios temporales para diferentes funciones ecológicas. Un grupo de expertos de varias disciplinas se encarga de compilar y sintetizar la información disponible sobre diferentes aspectos de la ecología funcional del río (como las necesidades ecológicas de las especies acuáticas y ribereñas representativas y el comportamiento hidrológico y geomorfológico del río) y socioeconómicos (como la calidad estética, la dependencia social y cultural al río y los beneficios económicos del uso del recurso hídrico; Castro Heredia *et al.*, 2006). Esa información es entonces integrada para realizar recomendaciones acerca del caudal a mantener en cada etapa funcional del río, vista como bloques. Se establece en primer lugar un caudal base que conforma el primer bloque, variando en función de las épocas hidrológicas, y en segundo lugar, se recomiendan bloques suplementarios para favorecer las funciones ecológicas (como la regeneración de los hábitats que necesitan de una crecida o la migración de los peces que necesitan un mayor caudal en un período definido, Fig. 5).

Tharme (2003) mencionó también la existencia de metodologías híbridas o combinadas, que implican la combinación de dos o más de las metodologías descriptas arriba. En particular, la información generada por una simulación del hábitat puede ser utilizada como aporte específico sobre el tema de la fauna acuática dentro de un análisis holístico.

SITUACIÓN DE LA REGIÓN ANDINA

Los Andes conforman la cadena montañosa más grande de América del Sur, atravesando Argentina, Chile, Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia y parte de Venezuela, abarcando una gran diversidad de climas, desde zonas desérticas a zonas tropicales. Las nacientes de varias grandes cuencas sudamericanas, como la del Río Amazonas, del Río Orinoco o del Río de la Plata, se originan *en parte* en los Andes, lugar a partir del cual se transportan el flujo hídrico, los sedimentos y la materia orgánica controlando así la morfología y la ecología de las zonas bajas de las cuencas. De esta manera, el área de influencia de los Andes, abarca casi la totalidad de América del Sur, tanto en su vertiente oriental como en la occidental, conformando la región andina.

La dependencia de la región en la generación de energía de origen hidroeléctrico y el crecimiento económico de la región de los últimos años a un ritmo que se mantendrá en el futuro (3,7 % en el 2012, y del 4 % para el 2013; World Economic Outlook, 2012), implica la construcción de represas para satisfacer las nuevas demandas energéticas. Actualmente, existen 48 represas con una capacidad de generar 2 MW y alrededor de 151 proyectos de represas a ser construidas en los próximos 20 años en 6 de los

principales tributarios andinos del Río Amazonas (Finer y Jenkins, 2012). Poff y Zimmerman (2010) recopilaron la información sobre los trabajos publicados en relación a la respuesta ecológica de la modificación del caudal de un río. Entre los grupos que presentaron una respuesta a esta modificación se encuentran los peces, macroinvertebrados bentónicos y la vegetación de ribera, siendo los peces un grupo indicador sensible de la alteración del caudal. En la región neotropical, los peces son los vertebrados más diversos, y en especial en los Andes presentan un alto grado de endemismo (Mirande y Aguilera, 2009). Estas características otorgan a los peces un alto valor de representatividad de la comunidad acuática y del funcionamiento ecológico que, sumado al hecho de que muchas poblaciones humanas dependen de este recurso para su alimentación, resaltan la importancia de generar información y herramientas para su conservación.

En la región andina, la mayoría de los análisis de la comunidad de peces de ríos están enfocados en la distribución de las especies, mientras que los trabajos que evalúan las consecuencias de las alteraciones del caudal sobre las especies son escasos (Anderson *et al.*, 2011). América Latina, de igual modo que Europa del Este, África y Asia, son las regiones del mundo con el menor número de experiencias de evaluación de caudales ambientales (Tharme, 2003). Sin embargo, varios estudios locales se realizaron en casi todos los países de la región (Apéndice 1), desde los primeros trabajos desarrollados en Brasil y Chile a finales de los años 90 (CONAMA-Chile, 1998; Benetti *et al.*, 2003). Entre los métodos de estimación de los caudales ecológicos, los de tipo hidrológico fueron los más utilizados, como en el resto del mundo (Tharme, 2003), en principio porque son los de más fácil y rápida evaluación, a pesar de que poco tienen que ver con las necesidades reales del ecosistema. Las aplicaciones de métodos hidráulicos y de simulación de hábitat están también bien representadas, mientras que las aplicaciones de los métodos holísticos son todavía escasas. Esta falta de representación de metodologías holísticas en la región andina como la BBM o la metodología ELOHA (Ecological Limits of Hydrologic Alteration, Poff *et al.*, 2010) se debe a la falta de estudios sobre la respuesta ecológica de los distintos grupos biológicos a la alteración de

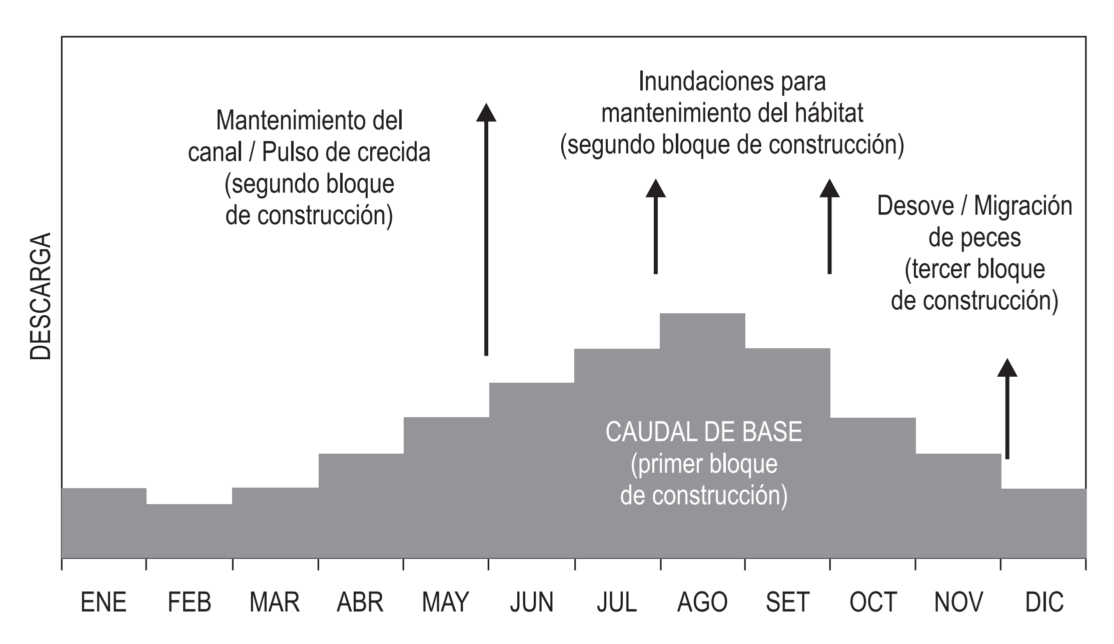


Figura 5. Ilustración de la Block Building Methodology (BBM). Adaptado de King *et al.* 2008.

los caudales hídricos en la región, lo cual constituye un requisito previo a la aplicación de estas metodologías. Este faltante de información, sumada a la alta diversidad y endemismo de las especies en los Andes, hacen prioritario el estudio de las relaciones entre estas especies y su medio. Los métodos de simulación de hábitat (*i.e.*, PHABSIM) se presentan como una solución efectiva para la generación de la información ecológica sobre la biota acuática y al mismo tiempo para suplir la demanda actual sobre estudios de respuesta ecológica ante la alteración del hábitat especifica en cada situación. A pesar de su complejidad y de la mayor inversión que implican, esta metodología es reconocida como una de la más precisas y efectivas (Tharme, 2003), siendo la más adecuada para la región.

El panorama a futuro es alentador debido a la creciente necesidad de políticas para el manejo de las cuencas, ya que las legislaciones relacionadas al recurso agua de muchos países sudamericanos se encuentran actualmente en reforma (Iza y Rovere, 2006), queriendo incluir (o incluyendo ya) en muchos casos el concepto de caudal ecológico o ambiental. Aunque la definición de este concepto varía en relación a las necesidades de las prioridades de cada país, la adaptación de los métodos creados para ríos de América del Norte, Europa o África, a las caracteristicas propias de cada región sudamericana (andina, subandina, tropical, etc.) es un reto que podría revelarse de interés internacional.

ADAPTACIÓN DEL MÉTODO PHABSIM EN LA REGIÓN ANDINA

Los ríos de la región andina presentan, desde sus nacientes hasta su desembocadura, una gran heterogeneidad ambiental y una alta diversidad (de 400 a 600 especies) y tasa de endemismo (40 %) de los peces (Anderson y Maldonado Ocampo, 2010) que desafían los métodos actuales para la determinación de caudales ecológicos. Sin embargo, la existencia de estudios que confirman la preferencia de hábitat de las comunidades de peces en los ríos andinos (*e.g.*, Maldonado-Ocampo *et al.*, 2005; Pouilly *et al.*, 2006; Jaramillo-Villa *et al.*, 2010; Shaefer y Arroyave, 2010) hacen posible el desarrollo de la metodología PHABSIM en esta región.

La parte de modelización hidráulica no presenta restricciones ni requiere adaptaciones mayores, ya que las reglas físicas que rigen la circulación del agua son las mismas para los ríos de todas las partes del mundo. Pero, debido a los cambios de fauna y de ciclo hidrológico, los modelos biológicos tienen que ser adaptados a las especies y a las comunidades acuáticas locales o regionales. En la región andina, a excepción de las zonas de altitud mayor a los 1500 msnm, la mayoría de los ríos presentan una diversidad mayor a 30 especies, lo que dificulta el establecimiento de modelos para todas las especies (y estadio de desarrollo de cada una: alevines, juveniles y adultos) y el uso simultáneo de todas estas especies en una aplicación. Por lo tanto, resulta importante lograr un conocimiento de la biología de las especies suficiente para determinar especies representativas (o «paraguas») o gremios funcionales de especies. Por ejemplo, Maldonado-Ocampo *et al.* (2005) clasificaron a los peces andinos en tres grupos (especies de torrente, pelágicas y de pozas) de acuerdo a la forma de su cuerpo y su uso del hábitat. De esta manera se pueden determinar curvas de preferencia de hábitat para cada gremio agrupando las especies con un modo de vida similar, simplificando así la aplicación de los modelos de simulación del hábitat.

Además, es importante estudiar y considerar la importancia de las variaciones hidrológicas sobre el ciclo de vida de las especies y la regulación de las comunidades de peces. Estas generalmente presentan contrastes muy marcados con una época de baja disponibilidad de hábitat durante los períodos de caudales de estiaje (época seca) y un período de caudal máximo en época de lluvia que muchas veces sirven de control para la reproducción o la migración de las especies.

Muchos países de Sudamérica se encuentran actualmente en vías de desarrollo, con

políticas de estado y necesidades distintas a la de los países en los cuales se desarrollaron los métodos para definir caudales ecológicos. La creación de nuevas represas en el sector andino es una realidad y una necesidad, es por esto que actualmente la región se encuentra en un punto estratégico donde se puede estimar, mediante la aplicación de métodos como PHABSIM, cuál es la vulnerabilidad de los ríos y las consecuencias de los potenciales proyectos de modificación de la hidrología o la morfología de los ríos. La alta diversidad de especies en los ríos sudamericanos puede ser vista como una desventaja para la aplicación de las metodologías de simulación de hábitat por la dificultad que se presenta a la hora de integrar la información para cada una de las especies que habitan en un río y sus estadios. Sin embargo, el uso de modelos biológicos para grupos funcionales de especies, con requerimientos de hábitat similares, puede facilitar la implementación de estos métodos, al reducir el alto número de especies que habitan en la región andina a unos pocos grupos como los propuestos por Maldonado-Ocampo (2005). La utilización de estos grupos permitirá, además, generar modelos de preferencias del uso del hábitat válidos para todo el sector andino, facilitando de esta manera el uso regional de la metodología.

La metodología PHABSIM provee, de esta manera, una herramienta con base técnica sólida útil para las autoridades en la toma de decisiones, contemplando la relación costo-beneficio económico-ambiental, sobre la realización de obras hidráulicas que modificarán un río, o del caudal necesario para que el río alterado mantenga la integridad y los servicios ecológicos. A pesar de los beneficios de PHABSIM, la aplicación de este método a un nivel regional dependerá de la convergencia de las políticas gubernamentales sobre sus necesidades y uso del agua actuales. La concientización ciudadana sobre la importancia de los recursos acuáticos y sobre el concepto de caudales ecológicos, es también importante para generar un ambiente donde la presión social ejerza su influencia sobre las autoridades para generar políticas relacionadas a la conservación del ambiente. Cualquiera sea el método usado y las necesidades de los país, resulta evidente que en la gestión integral de los recursos hídricos, el papel de los caudales ecológicos es cada vez más valorado, para aprovechar del recurso agua sin perjudicar la salud ambiental.

AGRADECIMIENTOS

A la editora de Acta Zoológica Lilloana, Monique Halloy, por la invitación para realizar esta revisión. A la Fundación Miguel Lillo (FML-Tucumán, Argentina) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por su constante apoyo. Se agradece a los revisores anónimos de la primera versión de este manuscrito, quienes aportaron de forma constructiva a su mejoramiento, y a Marcos Mirande por la revisión de la versión final de este manuscrito.

LITERATURA CITADA

Agostinho, A. A., Pelicice, F. M. y Gomes, L. C. 2008. Dams and the fish fauna of the neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. Brazilian Journal of Biology, 68(4, Suppl.): 1119-1132.

Anderson, E. P. y Maldonado-Ocampo, J. A. 2010. A regional perspective on the diversity and conservation of tropical andean fishes. Conservation Biology, 25(1): 30–39.

Anderson, E. P., Freeman, M. C. y Pringle, C. M. 2006. Ecological consequences of hydropower development in Central America: Impacts of dams and water diversion on neotropical stream fish assemblages. River Research and Applications, 22: 397-411.

Anderson, E. P., Encalada, A. C., Maldonado-Ocampo, J. A., McClain, M. E., Ortega, H. y Wilcox, B. P. 2011. Environmental flows: a concept for addressing effects of river alterations and climate change in the Andes. En: S. K. Herzog, R. Martinez, P. M. Jørgensen y H. Tiess (eds.), Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 348 pp.

Benetti, A., Lanna, E. y Cobalchini, M. 2003. Metodologías para determinação de vazões ecológicas em rios. Revista Brasilera de Recursos Hídricos, 8(2): 149-160.

Bovee, K. D. 1982. A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. Instream Flow Information Paper No. 12, U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-82/26, Fort Collins, Colorado.

Castro Heredia, L. M., Carvajal Escobar, Y. y Monsalve Durango, E. A. 2006. Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá Colombia, 10(2): 1-28.

Collings, M. R., Smith, R. W. y Higgins, G. T. 1972. The hydrology of four streams in western Washington as related to several Pacific salmon species. USGS Water-Supply Paper 1968, Washington, D.C., 109 pp.

Comisión Mundial de Represas (WCD). 2000. Represas y Desarrollo: Un Nuevo Marco para la Toma de Decisiones. Informe Final de la Comisión. Earthscan Publications Ltd. Inglaterra y Estados Unidos.

Compendio de Series Estadísticas de la Comunidad Andina. 2011. Resumen Ejecutivo. Disponible en: http://estadisticas.comunidadandina.org/eportal/contenidos/imagenes/file/CE2011/SGde422.pdf.

CONAMA, Chile. 1998. Documento de Discusión: Gestión Integrada del Recurso Agua www.conama.cl/cds/cat_10acta.

Dyson, M., Bergkamp, G. y Scanlon, J. (eds). 2003. Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales. Tr. José María Blanch, San José, Costa Rica, UICN-ORMA, 125 pp.

EMTS. 2010. Environmental Mitigation Technology for Hydropower: Summary Report on a Summit Meeting Convened by Oak Ridge National Laboratory, the National Hydropower Association, and the Hydropower Research Foundation, 1-12 pp. Disponible en : http://www.esd.ornl.gov/WindWaterPower/EMTSSummit.pdf

Finer, M. y Jenkins, C. N. 2012. Proliferation of Hydroelectric Dams in the Andean Amazon and Implications for Andes-Amazon Connectivity. PLoS ONE 7(4):e35126, doi:10.1371/journal.pone.0035126.

Iza, A. y Rovere, M. 2006. Gobernanza del agua en América del Sur: dimensión ambiental. Cambridge, UK, UICN, Serie de Política y Derecho Ambiental, 53: 3.

Jaramillo-Villa, U., Maldonado-Ocampo, J. A. y Escobar, F. 2010. Altitudinal variation in fish assemblage diversity in streams of the central Andes of Colombia. Journal of Fish Biology, 76(10): 2401–2417.

King, J. M. y Louw, D. 1998. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the building block methodology. Aquatic Ecosystem Health and Management, 1: 109-124.

King, J. M., Tharme, R. E. y de Villiers, M. S. (eds.). 2000. Environmental flow assessments for rivers: manual for the building block methodology. Water Research Commission Report TT 131/00, Pretoria, South African Water Research Commission.

King, J. M., Tharme, R. E. y de Villiers, M. S. (eds.). 2008. Environmental flow assessments for rivers: manual for the building block methodology (updated edition). WRC Report No TT 354/08, 364 pp.

Maldonado-Ocampo, J. A., Ortega-Lara, A., Usma, J., Galvis, G., Villa-Navarro, F., Vásquez, G., Prada-Pedreros, S. y Ardila, C. 2005. Peces de los Andes de Colombia, Guía de Campo. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá, Colombia.

Mirande, J. M. y Aguilera, G. 2009. Los peces de la selva pedemontana del noroeste argentino. En: A. Brown, P. G. Blendinger, T. Lomáscolo y P. Garcia Bes (eds.), Selva Pedemontana de las Yungas. Historia Natural, Ecología y Manejo de un Ecosistema en Peligro, pp. 169 – 211.

Murchie, K. J., Hair, K. P. E., Pullen, C. E., Redpath, T. D., Stephens, H. R. y Cooke, S. J. 2008. Fish response to modified flow regimes in regulated rivers: research methods, effects and opportunities. River research and applications, 24: 197-217.

Poff, N. L. y Zimmerman, J. K. H. 2010. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. Freshwater Biology, 55: 194–205.

Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegaard, K. L., Richter, B. D. Sparks, R. E. y Stromberg, J. C. 1997. The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration. BioScience, 47(11): 769-784.

Poff, N. L., Richter, B. D., Aarthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B. P., Freeman, M.C., Henriksen, J., Jacobson, R. B., Kennen, J. G., Merritt, D. M., O'Keeffe, J. H., Olden, J. D., Rogers, K., Tharme, R. E. y Warner, A. 2010. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. Freshwater Biology, 55: 147–170.

Pouilly, M., Barrera, S. y Rosales, C. 2006. Changes of taxonomic and trophic structure of fish assemblages along an environmental gradient in the Upper Beni watershed (Bolivia). Journal of Fish Biology, 68: 137–156.

Shaefer, S. A. y Arroyave, J. 2010. Rivers as islands: determinants of the distribution of Andean astroblepid catfishes. Journal of Fish Biology, 77(10) : 2373–2390.

Tennant, D. L. 1976. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Fisheries, 1(4):6-10.

Tharme, R. E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental

flow methodologies for rivers. River Research and Applications, 19: 397-441.
World Economic outlook. 2012. Growth Resuming, Dangers Remain. World Economic and Financial Surveys-International Monetary Fund. Disponible en http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2012/01/pdf/text.pdf

APÉNDICE 1

Números y lista no exhaustiva de los trabajos realizados en Sudamérica, ya sea la aplicación de una metodología concreta en un río, la revisión de un método, o los criterios adoptados por entidades que regulan el recurso agua para evaluar los caudales ecológicos. En la tabla, debajo de cada uno de los métodos, los números por fuera de los corchetes corresponden al número de trabajos encontrados para cada país sobre un método en particular; los números entre corchetes corresponden a las referencias listadas en la bibliografía.

Métodos País	Hidrológico	Hidráulico	Simulación de hábitat	Holístico
Argentina	Hidrológicos ¿?	1 [1]	1 [2]	
Bolivia	1 [3]	1 [4]		
Brasil	6 [5,6,9,10,13,16]	5 [5*,7,15,17]	1 [14]	3 [8,11,12]
Chile	5 [18,19,20,21,23]	4 [20,21,22,23]	4 [20,21,23,47]	
Colombia	5 [24,25,30,31,33]	3 [24,25,31]	3 [26,28,29]	2 [27,32]
Ecuador			1 [34]	1 [35]
Paraguay	1 [36]			
Perú	4 [37,38,39,40]	1 [38]	2 [38,39]	1 [41]
Venezuela	3 [43,45,46]	2 [42,44]		

* incluyendo un modelado ecohidráulico (WAIORA)

1. Lucino, C., Lisia, S., Del Banco, M. y Angulo, M. 2010. Metodología para la evaluación y definición de regímenes de caudales ambientales en aprovechamientos hidráulicos. VI Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidráulicos. www.cadp.org.ar/docs/congresos/2010/100.pdf.
2. Langa Sánchez, A., Pagot, M., Rodríguez, A. y Martínez Capel, F. 2009. Estudio de caudales ecológicos en ríos de la provincia de Córdoba. Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Salta, Argentina. Disponible en: http://irh-fce.unse.edu.ar/Rios2009/CD/TC/D/TC_D05_LangaSanchez_Estudio_Q_ecologico_Los_Molinos.pdf.
3. Verweij, M. 2005. A propósito del caudal ecológico. Disponible en: http://neolectum.com/pdfdocs/ndpz2002.pdf.
4. Anderson, E. P., Encalada, A. C., Maldonado-Ocampo, J. A., McClain, M. E., Ortega, H. y Wilcox, B. P. 2011. Environmental Flows: a Concept for Addressing Effects of River Alterations and Climate Change in the Andes. En: S. K. Herzog, R. Martinez, P. M. Jørgensen y H. Tiess (eds.), Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 348 pp.
5. Reis, A. A. dos. 2007. Estudo comparativo, aplicação e definição de metodologias apropriadas para a determinação da vazão ecológica na bacia do rio pará, em minas gerais. Tese de mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Disponible en www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/247M.PDF.
6. Ferreira de Queiroz, M. M., Sampaio, S. C., Gomes, B. M. y Lost, C. 2010. Estudo de vazões mínimas q1,10 e q7,10 de rios do paraná segundo distribuição generalizada. Revista Verde, Mossoró, RN, Brasil, 5 (3): 32–46.
7. Zeilhofer, P. y Nogueira de Lima, R. M. 2006. Regio: uma aplicação sig para subsidiar a regionalização de vazões. Caminhos de Geografia, 6 (17): 54–61.
8. Collischonn, W., Angra, S. G., Freitas, G. K. y Priante, G. R. 2006. Da vazão ecológica ao hidrograma ecológico. En: Congresso da Água, 8, Figueira da Foz, Anais, Lisboa, APRH. Disponible en www.ibcperu.org/doc/isis/10222.pdf

9. Silveira, A., Palma de Moura, R. M. y Reis de Andrade, N. L. 2006. Determinação da q7,10 para o Rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil e comparação com a vazão regularizada após a implantação do reservatório de aproveitamento múltiplo de manso. XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Punta del Este, Uruguay.
10. Tavares de Carvalho, L. M., Marques, J. J., Louzada, J. N., de Mello C. R. y Pereira J. R. Qualidade ambiental, risco ambiental e prioridades para conservação e recuperação. Disponible en http://www.redeapasul.com.br/publicacoes/componente_qualidade_ambiental_risco_ambiental.pdf.
11. Oliveira Galvão, D. 2008. Subsídios à determinação de vazões ambientais em cursos d'água não regulados: o caso do ribeirão pipiripau (df/go). Dissertação de mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Florestal da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Disponible en: http://efl.unb.br/arq_pdf/dissertacao/2008/Deise_Maria_de_Oliveira.pdf.
12. Fonseca Lose Britto, K. 2005**.** Estudo da aplicação do método de estabelecimento de vazões ecológicas Building Blocks Methodology – BBM – para o caso da pch estação indaial. Dissertação de Mestre em Engenharia Ambiental, em Engenharia Ambiental do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Regional de Blumenau. Disponible en: http://proxy.furb.br/tede/tde_arquivos/5/TDE-2007-06-25T075040Z-317/Publico/Diss%20Karen%20Fonseca%20Lose%20Britto.pdf.
13. Correa Curado, L. y Steffen, J. L. Proposta para a definição de vazão mínima (ecológica) no rio aquidauana-ms. Disponible en: http://www.abrh.org.br/novo/ii_simp_rec_hidric_centro_oeste_campo_grande71.pdf.
14. Braga Pelissari, V., Sarmento, R. y Texeira, R. L. Vazão ecológica a ser considerada no licenciamento ambiental dos sistemas de abastecimento de água. Disponible en: http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/saneab/brasil/iv-005.pdf.
15. Sousa Runkel, D. V. 2010. Vazão ambiental em Belo Monte. Análise do estudo de impactos ambientais e aplicação do método do perímetro molhado para comparação crítica. Tese para a obtenção do grau de engenheiro ambiental da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 68 pp. Disponible en: http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001817.pdf.
16. Silva Santos Silva, V., Macedo Firmino, M. B., Sarmento Vieira, A., Fadlo Curi, W. y Curi, R. C. 2006. Análise da vazão de diluição de poluentes em sistema de otimização integrado de dois reservatórios em série no semi-árido nordestino. VI SEREA, Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água João Pessoa, Brasil, 5 a 7 de junho de 2006. Disponible en: http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoA%20(2).pdf.
17. Silva A. M., de Oliveira, P. M., de Mello, C. R. y Pierangeli, C. 2006. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 10(2): 374–380. Disponible en: www.scielo.br/pdf/rbeaa/v10n2/v10n2a19.pdf.
18. Cedrem. 2009. Anexo 2.4. Caudal Ecológico - EIA Central Hidroeléctrica Maqueo. Disponible en: https://www.e-seia.cl/archivos/20090316.123508.pdf.
19. Gestión Ambiental Consultores. 2009. Anexo 7.4. Caudal Ecológico - EIA Central Hidroeléctrica Águas Calientes. Disponible en: http://seia.sea.gob.cl/archivos/add_20090413.151224.pdf.
20. GESAM Consultores. 2009. Anexo 10 - Caudal Ecológico «Proyecto Hidroeléctrico Achibueno», Centrales «El Castillo» y «Centinela», Región del Maule, Chile. Disponible en: http://seia.sea.gob.cl/archivos/Anexo_10._Caudal_Ecologico.pdf.
21. Endesa Chile. 2010. Anexo G - Estudio De Caudal Ecológico en El Río Fuy, Proyecto Hidroeléctrico Neltume. Disponible en: http://seia.sea.gob.cl/archivos/Anexo_G_-_Caudal_ecologico.pdf.
22. Zavala, H. Z. y Cepeda, J. P. 2006. Caudales Ecológicos en Vegas Altoandinas: un Estudio de Caso. GEOECOLOGÍA de los ANDES desérticos. En: P. Cepeda (ed.), La Alta Montaña del Valle del Elqui. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile, pp. 525-551. Disponible en: http://www.userena.cl/investigacion/publicaciones/archivos/4/Caudales%20ecologicos%20en%20vegas%20altoandinas%20H%20Zavala%20Z%20&%20J%20Cepeda%20P.capitulo%203.9.pdf.
23. Jamett, G. 2006. Evaluación del concepto caudal ecológico como medida para la conservación de ecosistemas lóticos. Tesis para la obtención del título de Magister en Gestión y Planificación Ambiental de la Universidad Nacional de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Santiago, Chile. Disponible en: http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Jamett,%20Gabriela.pdf.
24. Rizo, F., Villegas, C. E. A. y Bettín, M. A. Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la Cuenca Alta del Río Chicamocha. Corporación Autónoma Regional de Boyacá Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Centro de Estudios Económicos, Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Investigaciones Ambientales. Disponible en: www.corpoboyaca.gov.co.
25. Diez Hernández, J. M. y Burbano Burbano, L. 2007. Tecnología Ecológica Para La Planificación De Cuenca Hidrográficas: Regímenes Caudales Ambientales. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 5(2): 20-31. Disponible en: www.unicauca.edu.co/biotecnologia/ediciones/vol5/2.pdf.

26. Diez Hernández, J. M. y Ruiz Cobo, D. H. 2007. Determinación de caudales ambientales confiables en Colombia: el ejemplo del río Palacé (Cauca). Investigación, Volumen 10(4): 153-166. Disponible en: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/viewFile/1387/1999.
27. Universidad Nacional de Colombia - Grupo GIREH. 2008. Metodología para la Estimación del Caudal Ambiental en Proyectos Licenciados. Informe Final. Universidad Nacional de Colombia - Grupo GIREH. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Dirección de Licencias, OEI. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/documentos/4205_081009_info_comen_final_caudal_ambiental_301109.pdf.
28. Diez Hernández, J. M. y Olmeda Sanz, S. 2008. Diseño Eco-hidrológico de pequeñas centrales hidroeléctricas: evaluación de caudales ecológicos. Revista Energética, 39: 65-76. Disponible en: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/energetica/article/viewFile/9405/10020.
29. Diez Hernández, J. M. y Burbano Burbano, L. 2006. Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas. Revista de Ingeniería e Investigación, 26(1): 58-68. Disponible en: http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/643/64326107.pdf.
30. Sabas, R. C. A. y Paredes Cuervo, D. 2009. Estudio de oferta y demanda hídrica en la cuenca del Río Barbas. Scientia et Technica, 15(42): 405-410. Disponible en: http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/849/84916714075.pdf.
31. Bustamante, D. 2008. Reglamentación de corrientes superficiales en la parte técnica para la gestión del recurso hídrico. Tesis para la obtención del título de Magister en Ingeniería, Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Medellín, Colombia, 230 pp. Disponible en: http://www2.unalmed.edu.co/minas/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=1027&Itemid=57.
32. Téllez, P., González, F., Guerrero, F., Prada, S. y Tharme R. E. Recomendaciones de caudal ecológico para el subsistema de abastecimiento de Bogotá, de los Ríos Chuza y Guatiquía. Disponible en: http://www2.emaapq.gob.ec/simposio1/memoriasSIMPOSIO/INDEX1_archivos/PRESENTACIONES/2.Miercoles%2024%20Nov/Tellez%20Patricia.pdf.
33. Rivera, H. G., Marin Ramirez, R. y Vanegas, R. 2004. Metodología de cálculo del índice de escasez. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 37 pp. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/Puerta/destacado/vivienda/gestion_ds_municipal/nuevas_resoluciones/Rs_0865_Metodolog%C3%ADa_anexo%20.pdf.
34. Fossati O., Rosero, D., Calvez, R. y Le Goulven, P. 2008. Proyecto para definir caudales ecológicos en ríos del sistema Papallacta. Cronograma 2008, 10 pp. http://www.mpl.ird.fr/divha/aguandes/ecuador/papallacta/inf/M4-Crono-08.pdf.
35. Gallardo, M. J. 2010. Proyecto piloto para la estimación de caudales ambientales en la cuenca del Río Pastaza, basado en un panel de expertos. Tesis para la obtención del título en Ingeniero Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador, 162 pp. Disponible en: http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2238.
36. LEY N□ 3239. 2007. De Los Recursos Hidricos del Paraguay Agua Potable y Alcantarillado Sanitario para La Republica del Paraguay. Articulo 33, Inc. B. Disponible en: http://www.geologiadelparaguay.com/Ley-de-aguas.pdf.
37. NAVAS CARBO. X. 2003. Las Minicentrales Hidroeléctricas: sus verdaderos impactos socio-ecológicos y políticos. El caso del proyecto Río Calope en Cotopaxi, Ecuador, 9 pp. Disponible en: www.fnca.eu/fnca/america/docu/1933.pdf.
38. Gil Mora, J. E., Cruz Miranda, L. J., Loaiza Schiaffino, C. H., Carreño Peralta, E. J., Blas Abregú, V. E., Álvarez Moscoso, M. E. y Gutiérrez Cusi, Y. 2010. Evaluación y análisis de los estudios de impacto ambiental y confrontación de oferta y demanda del Apurimac al Rio Salado. Centro Boliviano de Estudios Multidisciplinarios (CEBEM), 7 pp. Disponible en: http://www.cebem.org/cmsfiles/articulos/evaluacion_apurimac.pdf.
39. Vilchez Ochoa, G. 2010. Servicio de consultoría para la sistematización y seguimiento de la aplicación de metodologías de determinación del caudal ecológico en cuencas hidrográficas en el marco de las acciones de seguimiento e intervención. Ministerio del Ambiente, Viceministerio de Gestión Ambiental, Dirección General de Calidad Ambiental, 30 pp. Disponible en: http://cdam.minam.gob.pe:8080/dspace-consultorias/bitstream/123456789/83/1/CD000040.pdf.
40. Determinación de caudal ecológico mínimo del Río Molloco. 2008. Empresa de Generación Eléctrica de Arequipa S.A. (EGASA). Estudio de Impacto Ambiental de la Central Hidroeléctrica Molloco, 10 pp. Disponible en: http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaae/publicaciones/resumen/molloco/Anexo%20Caudal.pdf.
41. Ramos Taipe, C. L. 2010. Metodología aplicada en el análisis de los efectos de la producción de cultivos bioenergéticos sobre la disponibilidad de recursos hídricos: el caso del sistema Chira. En: E. Felix y C.

Rosell (eds.), Bioenergía y Seguridad Alimentaria «BEFS». El análisis de BEFS para el Perú, Compendio técnico, Volumen II, Metodologías. Disponible en: http://www.fao.org/docrep/013/i1708s/i1708s06.pdf.

42. Díaz Martín, D. 2000. Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en la Cuenca Alta del Río Tocuyo, Venezuela: Lecciones Aprendidas y Acciones por Emprender. Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela, 10 pp. Disponible en: http://cmsdata.iucn.org/downloads/diegodiazvenezuela.pdf.
43. Mejía J., Páez, G. y Boada, J. 2008. Prioridades de conservación del recurso agua en la cuenca alta del río Chama, estado Mérida, Venezuela. Revista Geográfica Venezolana, 49(2): 247-265. Disponible en: http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/29830/1/articulo5.pdf.
44. Guevara Pére, E. 2007. Modelación de los caudales ecológicos en ríos de Venezuela. Revista Ingeniería UC, 14(2): 25-34. Disponible en: http://redalyc.uaemex.mx/pdf/707/70711528005.pdf.
45. Pérez Roas, J. Servicios Ambientales Prioritarios Identificados en la Experiencia Venezolana, 25 pp. Disponible en: http://www.cifor.org/pes/publications/pdf_files/Venezuela_supplement_report.pdf.
46. Quintero, L. E. y Anido, J. D. 2004. Estimación de pasivos ambientales mediante la técnica Obligaciones Económicas de los Usuarios: Caso: Aguas de Mérida C.A. Actualidad Contable FACES, Mérida, Venezuela, 7(9): 61-77. Disponible en: http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/17339/1/articulo6.pdf.
47. Pouilly, M. y Aguilera G. 2012. Evaluación Inicial de Caudales Ecológicos/ Ambientales en la cuenca del río Huayco, Chile, mediante la simulación del hábitat físico del pejerrey *Basilichthys microlepidotus* y el camarón de río *Cryphiops caementarius*. UICN, Quito, Ecuador, 57 pp.